“三北”工程地区植被覆盖变化特征及其驱动力分析
——以宁夏为例

齐容镰[1]， 李庆波[1]， 任 佳[1]， 邹 苗[1]， 杨昊鹏[1]， 魏耀峰[1]， 唐 琼[2]

（1. 宁夏回族自治区林业调查规划院，宁夏 银川 750010; 2. 阿拉善右旗林业和草原工作站，内蒙古 阿拉善盟 737300）

摘 要：宁夏作为唯一被全境划入“三北”防护林工程的省份，其生态区位极为重要。本文基于宁夏2001—2020年长时间序列植被指数、气象等数据，通过趋势分析、残差分析以及Hurst指数等方法探究了宁夏NDVI时空变化特征及气候和人类活动对其变化的影响，并对宁夏NDVI未来变化趋势进行了预测。结果表明：（1）2001—2020年宁夏NDVI呈波动上升的趋势，年均增长速率为7.6×10^{-3}；空间分布上具有异质性，整体呈现“北部引黄灌区和南部山区高-中部干旱带低”的特征，并以低植被覆盖（0.2<NDVI≤0.4）为主，占52.33%；（2）2001—2020年，宁夏全区94.94%的面积NDVI为增加趋势，植被恢复取得明显效果，结合Hurst指数，未来宁夏65.23%的区域植被可能存在退化的潜在风险；（3）气候变化和人类活动对宁夏NDVI的影响均以正面为主，全区89.49%的区域是在气候变化和人类活动共同作用下引起的NDVI增长；各气候要素中，降水对NDVI变化起主要促进作用；（4）气候变化和人类活动对全区NDVI的相对贡献率分别为43.79%和56.21%。综上所述，在今后的植被恢复及生态建设中，应积极发挥人类活动在植被覆盖增加中的主导作用，并加强对现有植被的监测和管护，避免其出现退化趋势。

关键词：植被覆盖变化；气候变化；人类活动；驱动力；宁夏

植被作为地球陆地生态系统不可或缺的重要组成部分，连接着大气、土壤以及水文等生态要素，不仅有效调控着陆地生态系统的碳循环、水循环等[1-3]，同时对地区水源涵养、防风固沙和生态环境建设可持续发展等发挥着重要作用，可以作为指示器反映区域生态环境状况[4]。在全球气候变暖的大背景下，对植被变化进行动态监测并分析其变化原因成为了当下的研究热点之一。归一化植被指数（the Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）能够较为客观反映植被生长状况和覆盖变化程度[5]，因此对于长时间序列以及大尺度范围内植被变化和成因分析的研究多着眼于应用NDVI数据。目前，国内外学者对全球、全国或者区域尺度下的植被覆盖时空变化及其与气候环境、人类活动的响应均开展了相关分析研究[6-8]。

宁夏位于我国西北内陆，全区三面环沙，西、北、东分别被腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙地所包围，生态环境相对脆弱，同时具有黄河流域生态保护和高质量发展区、黄河重点生态区、黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区三区叠加的特点，是唯一被全境划入“三北”防护林工程的省份，生态区位极为重要[9]。因此，开展对宁夏全区植被覆盖变化趋势分析，探究其驱动因素等具有重要意义。有学者对宁夏全区、宁夏贺兰山、宁夏南部山区以及宁夏农牧交错带植被覆盖时空变化特征及驱动因子进行了分析研究[10-13]；也有学者针对宁夏不同植被类型以及宁夏草地植被NDVI时空变化及驱动因子进行分析[14-15]。以上研究对认识宁夏植被覆盖整体变化及驱动因素具有重要价值，但也存在一些不足之处，例如对于气候要素的考虑还不够完善，未加入太阳辐射这一因子，同时对植被覆盖变化与气候要素及人类活动关系的分析方法多集中于地理探测器等，对驱动因素相对贡献率的定量化描述不全面，并且缺乏对全区未来植被变化趋势的

收稿日期：2024-03-22； **修订日期**：2024-05-10
基金项目：内蒙古科技重大专项（2019ZD003）
作者简介：齐容镰（1996-），女，硕士，主要从事森林资源监测工作. E-mail: qrl199602@163.com
通讯作者：李庆波. E-mail: 87270953@qq.com

预测。

鉴于此,本文基于长时间序列植被指数、气象等数据,通过趋势分析、多元回归残差分析以及Hurst指数等分析方法探究了宁夏2001—2020年植被NDVI时空变化特征及气候和人类活动对植被变化的影响,量化了气候和人类活动驱动因子的相对贡献率,并对其未来变化趋势进行了预测,以期为宁夏境内实施的“三北”等重点生态工程建设效果评价提供科学依据,同时为全区荒漠化防治、科学造林以及黄河“几字弯”宁夏攻坚战提供理论支持和决策参考。

1　研究区概况

宁夏(104°17′~109°39′E、35°14′~39°23′N)地处西北内陆黄河上游地区,与甘肃、内蒙古和陕西接壤,下辖5个地级市。地势南高北低,分为北部引黄灌区、中部干旱带、南部山区三大板块(图1a),海拔范围为1083~3339 m(图1b)。全区属温带大陆性干旱、半干旱气候,降水由南向北递减,年平均降水量在175~650 mm,年均气温6.3~11.4 ℃,整体具有温差大、日照长、太阳辐射强、气候干燥、风大沙多等气候特点。宁夏全区植被类型丰富,自然植被类型主要包括草原、森林、灌丛和荒漠植被等[15]。

2　数据与方法

2.1　数据来源及预处理

2.1.1　NDVI数据　根据研究区域大小,文中所用NDVI数据来源于美国国家航空航天局(NASA),选取2001—2020年MOD13A3 NDVI数据产品,空间分辨率为1 km、时间分辨率为1个月。使用MODIS转换工具(MODIS Reprojection Tool,MRT)对数据进行格式转化,同时完成镶嵌、投影转换等处理。为消除云、大气、太阳高度角等天气状况影响,利用最大值合成法(Maximum Value Composites, MVC)对转换而成的数据进行进一步处理,通过裁剪、栅格计算等,最终得到宁夏20 a逐年NDVI栅格数据。

2.1.2　气象数据　本文中气象数据来源于中国气象数据共享服务网(http://data.cma.cn/),选择2001—2020年宁夏及其周边标准气象站点日尺度的降水量、温度(平均、最大和最小温度)、日照时数、相对湿度等数据,其中最大和最小温度、日照时数、相对湿度用于计算太阳辐射[16]。采用线性内插法对各

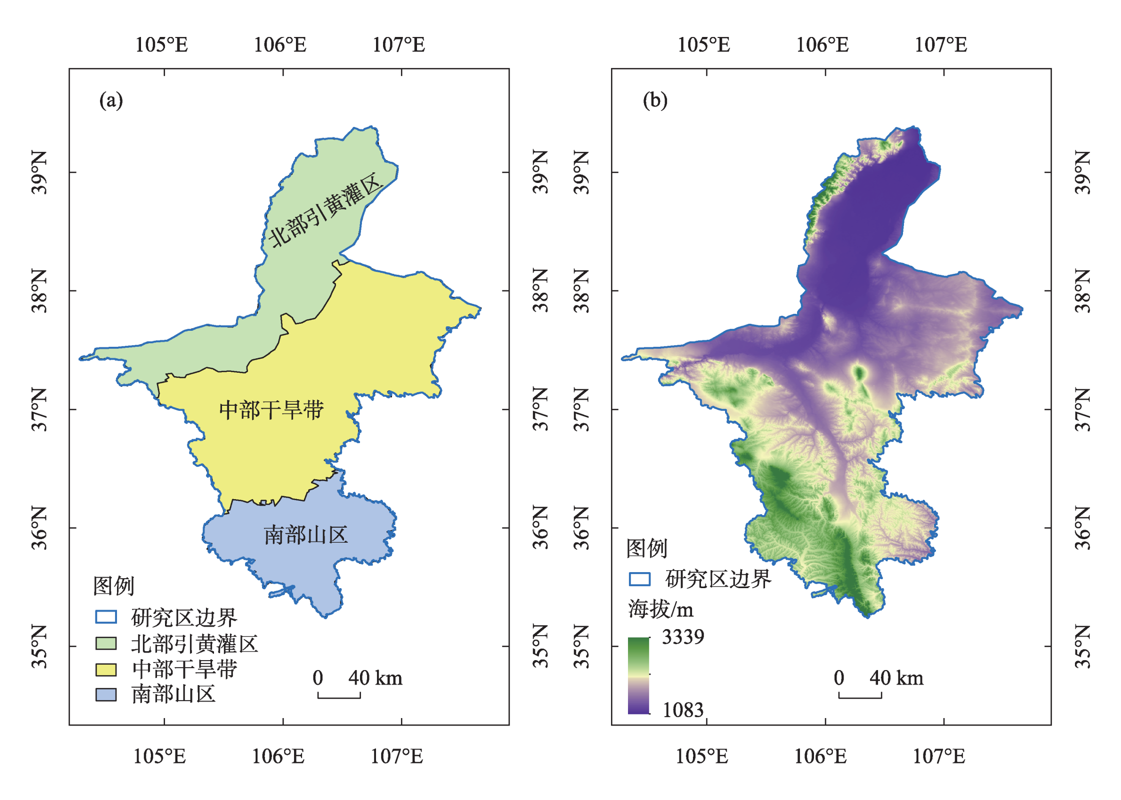


图1　研究区概况示意图

Fig. 1　Overview of the study area

气象要素的缺失值进行插补,将逐日数据处理得到各气象要素年际数据。通过ANUSPLIN 4.2软件进行空间插值,生成研究区域分辨率为1 km的降水量、温度、太阳辐射逐年气象栅格数据集,并采用ArcGIS软件进行一致性处理,降雨量、温度以及计算得出的太阳辐射用于驱动力分析。

2.2 研究方法

2.2.1 线性趋势分析 采用一元线性回归分析法对宁夏2001—2020年NDVI进行逐年逐像元趋势分析,得到其随时间序列的变化规律。计算公式如下:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times C_i - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} C_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \quad (1)$$

式中:n为年份;C_i为第i年的NDVI值;*Slope*为趋势斜率,用来反映NDVI年际变化特征。当*Slope* >0,植被覆盖度随着时间序列变化呈递增趋势,反之呈下降趋势。利用F检验法对趋势进行显著性检验,当$P<0.05$时,为显著变化,$P>0.05$则为不显著变化。依据趋势值与F检验结果将NDVI趋势变化划分为显著退化($P<0.05$,*Slope*<0)、不显著退化($P>0.05$,*Slope*<0)、显著增加($P<0.05$,*Slope*>0)及不显著增加($P>0.05$,*Slope*>0)4个等级。

2.2.2 偏相关分析 偏相关分析法通过控制其他要素,单独分析某一要素和另一要素之间的相关性。本文采用逐像元偏相关分析法分析降水、温度和太阳辐射与宁夏植被NDVI之间的相关性[17],计算公式如下:

$$r_{xy,z_1z_2,\cdots,z_n} = \frac{r_{xy,z_1z_2,\cdots,z_n} - r_{xz_g,z_1z_2,\cdots,z_{n-1}} \times r_{yz_g,z_1z_2,\cdots,z_{n-1}}}{\sqrt{\left(1 - r_{xn,z_1z_2,\cdots,z_{n-1}}{}^2\right)} \times \sqrt{\left(1 - r_{yz_n,z_1z_2,\cdots,z_{n-1}}{}^2\right)}} \quad (2)$$

式中:$r_{xy,z_1z_2,\cdots,z_n}$是在控制要素z_1、要素z_2、···、要素z_n的条件下,要素x与要素y之间的偏相关系数。利用T检验法对计算出的偏相关系数进行显著性检验。

2.2.3 残差及驱动力相对贡献率分析 多元回归残差分析法可以被用来确定气候变化和人类活动对NDVI变化的影响及相对贡献[7,18]。将降水量、温度和太阳辐射作为自变量,NDVI作为因变量,建立多元线性回归模型,计算回归系数。利用降水量、温度和太阳辐射原始数据及回归系数计算出气候要素影响下的NDVI值。计算公式如下:

$$\mathrm{NDVI_{CV}}(i,t) = a \times tem(i,t) + b \times pre(i,t) + c \times solr(i,t) + d \quad (3)$$

式中:$\mathrm{NDVI_{CV}}$为气候影响下的NDVI模拟值;*tem*为平均温度;*pre*为年降水;*solr*为太阳辐射;a、b、c、d分别为回归系数。将遥感影像解译的NDVI观测值$\mathrm{NDVI_{obs}}$与气候影响下的模拟值$\mathrm{NDVI_{CV}}$作差,得到残差值$\mathrm{NDVI_{HA}}$,为人类活动影响下的NDVI值。计算公式如下:

$$\mathrm{NDVI_{HA}} = \mathrm{NDVI_{obs}} - \mathrm{NDVI_{CV}} \quad (4)$$

对逐年$\mathrm{NDVI_{CV}}$与$\mathrm{NDVI_{HA}}$进行一元线性回归分析,得到的趋势率$slope(\mathrm{NDVI_{CV}})$与$slope(\mathrm{NDVI_{HA}})$可以分别表示气候变化和人类活动影响下的NDVI趋势变化。趋势率>0,气候要素或人类活动对植被生长起促进作用;反之,则为抑制作用,相关要素会导致NDVI值下降。同时,根据有关学者提出获取相对贡献率的原理[19],对区域NDVI变化的主要驱动因素进行分类,计算气候变化和人类活动对NDVI变化的相对贡献率,具体分类方式如表1所示。

2.2.4 未来趋势分析 Hurst指数(H)可用于定量描述要素未来变化特征,其表征时间序列持续性[20-21]。当$0\le H<0.5$时,表明要素未来变化趋势和过去相反,具有反持续性;当$H=0.5$时,则表示不存在长时间变化规律性;当$H>0.5$时,表明要素未来变化趋势和过去一致,时间序列具有持续性,越接近于1,持续性越强[22]。基于现阶段宁夏植被覆盖变化,通过R/S分析法计算Hurst指数,可以预测短期内植被的变化趋势。

2.2.5 Pearson相关性分析 采用Pearson相关系数(R_{xy})对逐年NDVI数据与宁夏各市逐年累计造林面积进行计算,量化NDVI和造林之间的相关性,$R_{xy}>0$,表示两个变量呈正相关;$R_{xy}<0$,表示两个变量呈负相关,R_{xy}绝对值越大,相关性越强。

3 结果与分析

3.1 宁夏NDVI时空变化特征

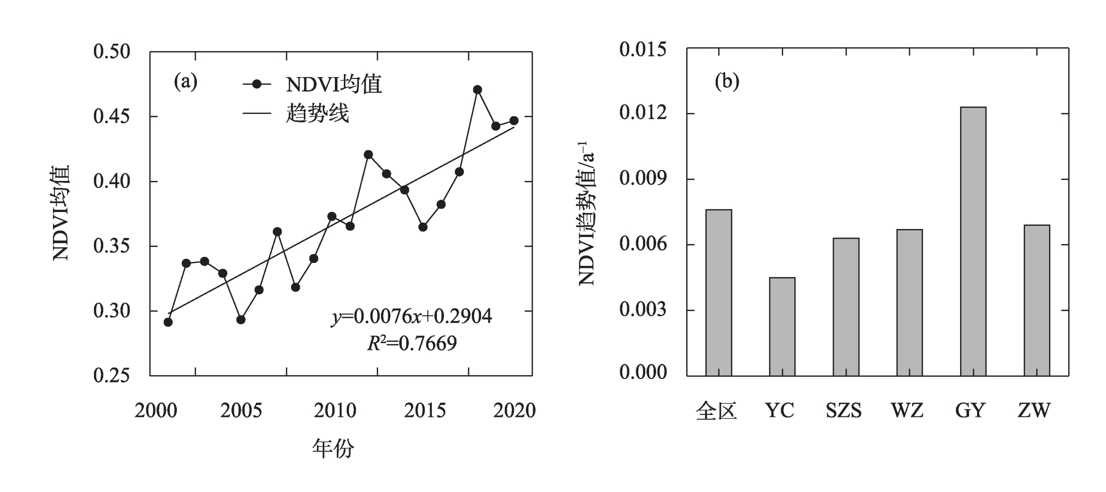
2001—2020年宁夏植被覆盖呈波动上升的趋势(图2a),NDVI年际变化范围分布在0.291~0.471之间,年均增长速率为7.6×10^{-3},说明在研究时段内全区植被得到了明显改善。具体来看,2001—2002年全区NDVI值呈上升趋势;2003—2005年逐年降

表1　气候变化和人类活动对植被覆盖变化的相对贡献率计算方法

Tab. 1　Method for calculating relative contributions of climate change and human activities to vegetation cover

slope(NDVI$_{obs}$)	驱动因素	驱动因素的划分依据		驱动因素的贡献率/%	
		slope(NDVI$_{CV}$)	*slope*(NDVI$_{HA}$)	气候变化	人类活动
>0	CV&HA	>0	>0	$\frac{slope(NDVI_{CV})}{slope(NDVI_{obs})}$	$\frac{slope(NDVI_{HA})}{slope(NDVI_{obs})}$
	CV	>0	<0	100	0
	HA	<0	>0	0	100
<0	CV&HA	<0	<0	$\frac{slope(NDVI_{CV})}{slope(NDVI_{obs})}$	$\frac{slope(NDVI_{HA})}{slope(NDVI_{obs})}$
	CV	<0	>0	100	0
	HA	>0	<0	0	100

注：CV与HA分别代表气候变化与人类活动；*slope*(NDVI$_{obs}$)为实际观测NDVI的趋势值；*slope*(NDVI$_{CV}$)和*slope*(NDVI$_{HA}$)分别为气候变化和人类活动影响下NDVI的趋势值。



注：YC为银川市；SZS为石嘴山市；WZ为吴忠市；GY为固原市；ZW为中卫市。下同。

图2　2001—2020年宁夏NDVI年际变化特征

Fig. 2　Characteristic of changes in NDVI in Ningxia from 2001 to 2020

低，随后又经历了3个"上升-下降"的阶段；2015—2018年NDVI值持续上升，增长速度较快，并在2018年达到了近年来最大值。

各市NDVI的增长趋势值不同(图2b)，趋势值越大，增长速率越快。其中固原市NDVI增长趋势值最大，为12.3×10^{-3} a^{-1}，中卫市次之(6.9×10^{-3} a^{-1})；银川市NDVI增长趋势值最低，为4.5×10^{-3} a^{-1}，这是由于其作为首府城市，人口相对密集，经济发展和城镇化水平较高，植被盖度增加空间有限。除固原市外，其余各市NDVI增长趋势均低于全区整体水平。

宁夏全域NDVI分布具有空间异质性，整体呈现"引黄灌区和南部山区高-中部干旱带低"的特征(图3a)，全区NDVI均值为0.37，其中固原市NDVI均值最高，整体达到了0.53，吴忠市和中卫市并列最低，均为0.31。参考前人划分标准和宁夏实际情况[23]，将宁夏NDVI分布划分为5个等级，分别为极低植被覆盖(NDVI≤0.2)、低植被覆盖(0.2<NDVI≤0.4)、中植被覆盖(0.4<NDVI≤0.6)、高植被覆盖(0.6<NDVI≤0.8)和极高植被覆盖(0.8<NDVI≤1.0)。通过空间统计分析，宁夏低植被覆盖占比最大，超过全区面积的一半，为52.33%，集中分布在中部干旱带和贺兰山东麓地区。极高植被覆盖占区域面积的1.05%，主要分布在包括隆德县和泾源县在内的六盘山区；高植被覆盖占比10.25%，集中分布在沿黄灌区、银川平原和六盘山部分区域；中植被覆盖主要在西吉县和彭阳县大部分地区，占区域面积的26.21%；极低植被覆盖占比10.16%，分布在贺兰山汝淇沟以北区域以及沿腾格里沙漠部分地区。

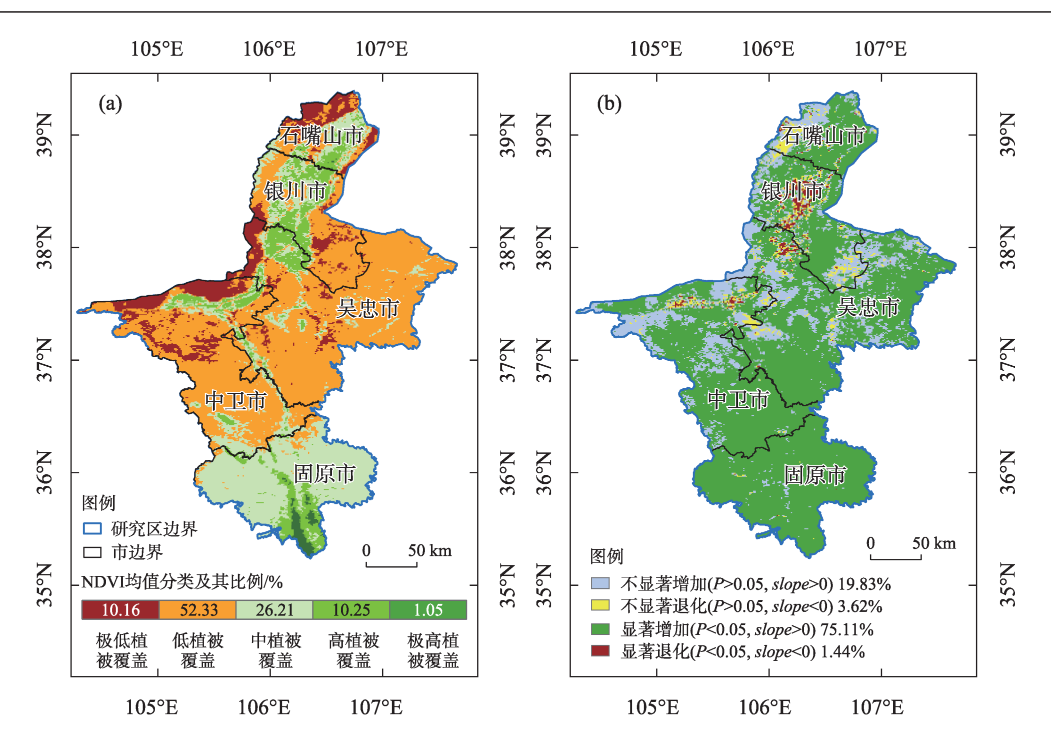


图3 宁夏NDVI空间分布特征及变化趋势

Fig. 3 Spatial distribution of NDVI and their trend changes in Ningxia

3.2 宁夏NDVI变化趋势

2001—2020年，宁夏全区植被覆盖整体呈增加趋势（图3b）。根据趋势值与*F*检验结果，得出全区94.94%的面积NDVI为增加趋势，其中75.11%的面积呈显著增加（$P<0.05$），不显著增加的区域占19.83%，零散分布在沿贺兰山-腾格里沙漠以及盐池县毛乌素沙地部分区域。全区植被覆盖退化的区域共占5.06%，其中不显著退化占比3.62%；显著退化面积（$P<0.05$）占比最低，主要集中在沿黄灌区的城镇分布区。总体来看，宁夏近20 a植被恢复取得了显著效果。

本文采用Hurst指数来分析未来宁夏全区植被覆盖变化持续性（图4a）。结果显示，近20 a宁夏植被覆盖Hurst指数平均值为0.47，未来变化趋势主要表现为反持续性。其中$0\leq H<0.5$的区域占65.40%，其未来植被变化趋势将可能与2001—2020年间的相反；$0.5<H<1$的区域占34.6%，说明这些区域未来植被变化表现为正向持续性，即与2001—2020年间的变化趋势相同。为进一步探究宁夏植被覆盖变化的趋势，将线性趋势结果与Hurst指数进行叠加分析，变化类型分为8种（表2），弱反持续性&改善为像元植被覆盖变化将与2001—2020年的改善趋势相反，但持续性较弱，其他类型解释与之类似。可以看出（图4b），宁夏全区有65.23%的区域面积植被可能会发生退化，弱反持续性&改善占主要部分为54.39%；强反持续性&改善占比为8.38%，主要分布在惠农区、沙坡头区、中宁县和西吉县。全区34.77%的区域未来在气候变化和人类活动的影响下会发生持续改善，其中以弱持续性&改善为主，占全区面积的30.14%。

3.3 宁夏NDVI变化驱动力分析

3.3.1 气候变化和人类活动对宁夏NDVI变化的影响分析 由图5a表明，气候变化对宁夏NDVI的影响在空间分布上具有差异性。全区59.92%的区域显示气候变化对NDVI影响呈现显著增加作用（$P<0.05$），主要分布在固原市以及海原县、同心县、盐池县等地区；影响为不显著增加的区域占32.71%，主要在宁夏中北部。气候变化导致植被退化的区域共占7.38%，其中气候变化导致NDVI显著退化的区域占1.85%（$P<0.05$），主要分布在银川平原、沙坡头区和中宁县的沿黄河区域。人类活动对于NDVI的影响在空间分布上同样具有异质性（图5b）。相比于气候变化，人类活动使宁夏NDVI显著增加的区域占比略低（$P<0.05$），为53.39%，主要分布在石嘴山市、固原市以及其他市县部分地区；不显著增加的区域主要在中部干旱带。人类活动使NDVI退化

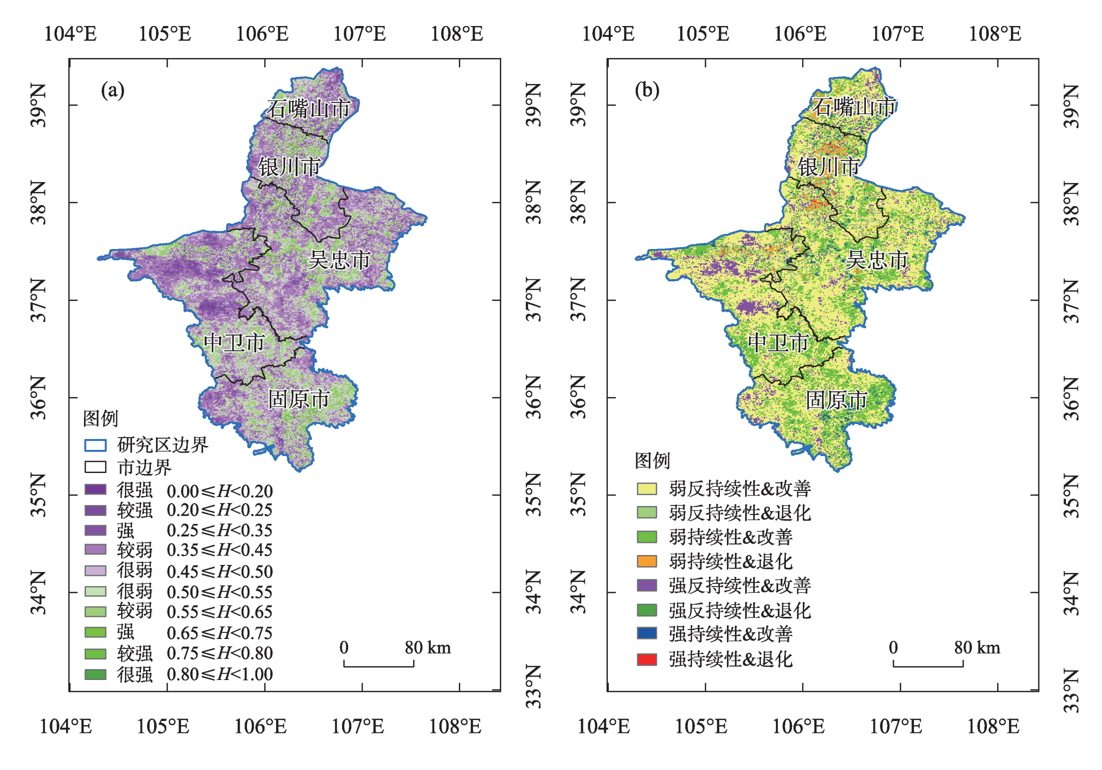


图4　宁夏NDVI未来演变趋势

Fig. 4　Future trend of changes in NDVI in Ningxia

表2　宁夏未来植被变化趋势类型

Tab. 2　Types of the future trend of changes in vegetation cover in Ningxia

变化趋势	Hurst指数	叠加变化类型	像元数/个	面积占比/%
>0	0.35≤*H*<0.50	弱反持续性&改善	28249	54.39
<0	0.35≤*H*<0.50	弱反持续性&退化	1205	2.32
>0	0.50≤*H*<0.65	弱持续性&改善	15653	30.14
<0	0.50≤*H*<0.65	弱持续性&退化	1048	2.02
>0	0.00≤*H*<0.35	强反持续性&改善	4355	8.38
<0	0.00≤*H*<0.35	强反持续性&退化	148	0.28
>0	0.65≤*H*<1.00	强持续性&改善	1056	2.03
<0	0.65≤*H*<1.00	强持续性&退化	227	0.44

的区域占比6.20%,其中显著退化的区域为0.8%($P<0.05$),集中分布在银川市区和利通区。

3.3.2　宁夏NDVI变化驱动力分析　气候因素和人类活动均能影响植被覆盖的变化[24]。由图6表明,宁夏全区89.49%的区域是在气候变化和人类活动共同作用下引起的NDVI增长;单独由气候变化导致NDVI增长的区域为1.98%,主要分布在大武口区、红寺堡区以及中宁县喊叫水乡和徐套乡等区域;单独由人类活动导致NDVI增长的区域占3.47%,主要分布在宁北少部分地区。全区有3.06%的区域显示气候变化和人类活动的共同作用是导致NDVI减小的驱动力,主要分布在银川市、利通区以及沙坡头区三地城镇化程度较高的区域;单独由气候变化导致NDVI减少的区域占0.84%;单独由人类活动导致NDVI减少的面积占1.16%,集中分布在贺兰山区域。

3.3.3　气候因子与NDVI的偏相关分析　由图7可以看出,宁夏全区2001—2020年年降水量和年均气温均呈上升趋势,太阳辐射变化呈下降趋势,研究时段内气候变化趋向暖湿化。

本文通过偏相关分析,探究宁夏近20 a NDVI与年降水量、年均气温及太阳辐射之间的关系,图8为通过显著性检验的各气候要素与NDVI偏相关系数空间分布($P<0.05$)。可以看出,NDVI与年降水量的偏相关系数为−0.62~0.91(图8a),二者呈显著正相关的面积占研究区总面积的66.92%,集中分布在中卫市、吴忠市和固原市;呈显著负相关的面积占0.28%。宁夏NDVI与年均气温的偏相关系数在−0.84~0.81之间(图8b),二者呈显著正相关的面积占研究区总面积的9.49%;呈显著负相关的面积占2.96%,主要分布在银川市、中宁县北部等区域。NDVI与年均太阳辐射的偏相关系数为−0.92~0.77之间(图8c),其中大部分区域呈现显著负相关,集中分布在中部干旱带,占研究区总面积的11.54%。

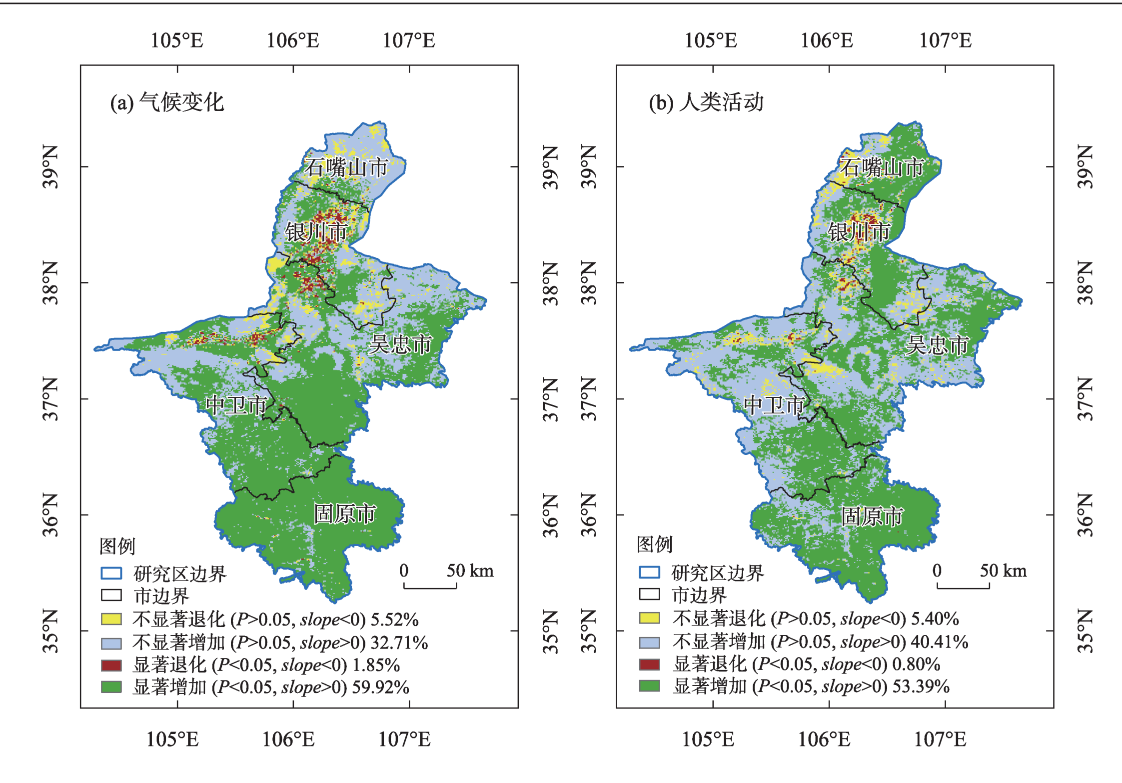
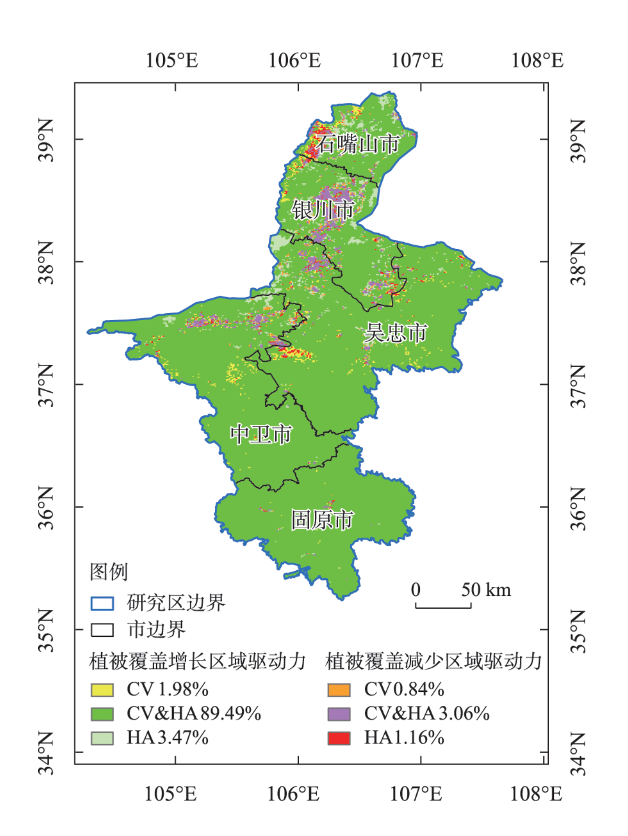


图5 气候变化和人类活动对宁夏NDVI的影响空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the effect of climate variations and human activities on changes in NDVI in Ningxia



注：CV表示气候变化单因素作用；CV&HA表示气候变化和人类活动共同作用；HA表示人类活动单因素作用。

图6 宁夏NDVI变化驱动因素空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the driving forces of changes in NDVI in Ningxia

综合来看，宁夏NDVI与降水、气温之间的关系以显著正相关为主（图8d），与太阳辐射之间以显著负相关为主，且近20 a宁夏年降水量与NDVI呈显著正相关的面积占比远大于其他气候要素，说明降水对植被NDVI的影响高于气温和太阳辐射，在气候要素中起主导作用，并且在空间分布上具有一定地域特征。

3.4 气候变化和人类活动对宁夏NDVI相对贡献率分析

通过残差分析和线性回归，对宁夏NDVI变化不同驱动因素的相对贡献率实现了定量化分析。整体来看，气候变化对全区NDVI的相对贡献率为43.79%，而人类活动的相对贡献率为56.21%，说明人类活动对植被覆盖变化占主导因素。为进一步分析气候变化和人类活动的相对贡献，将NDVI变化区分为增长区域（*slope*>0）和减少区域（*slope*<0）。在NDVI增长区域（图9a、图9b），气候变化和人类活动的相对贡献率分别为44.20%和55.80%，气候变化占主导因素（相对贡献率>50%）的区域面积占比37.62%，主要分布在同心县、中宁县、海原县以及盐池县麻黄山乡等；人类活动占主导因素的区域面积占比62.38%，主要分布在宁北及固原市部分地区。

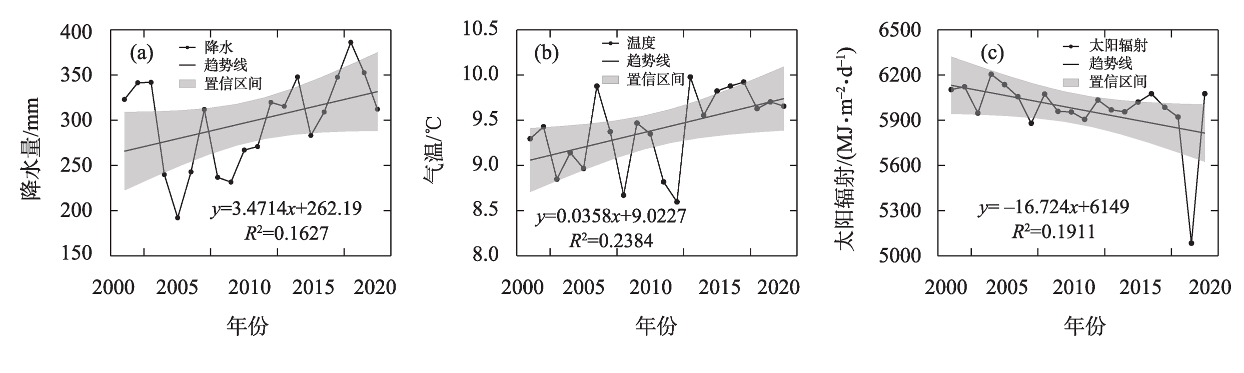


图7　气象要素变化趋势

Fig. 7　Trends in climatic factors from 2001 to 2020

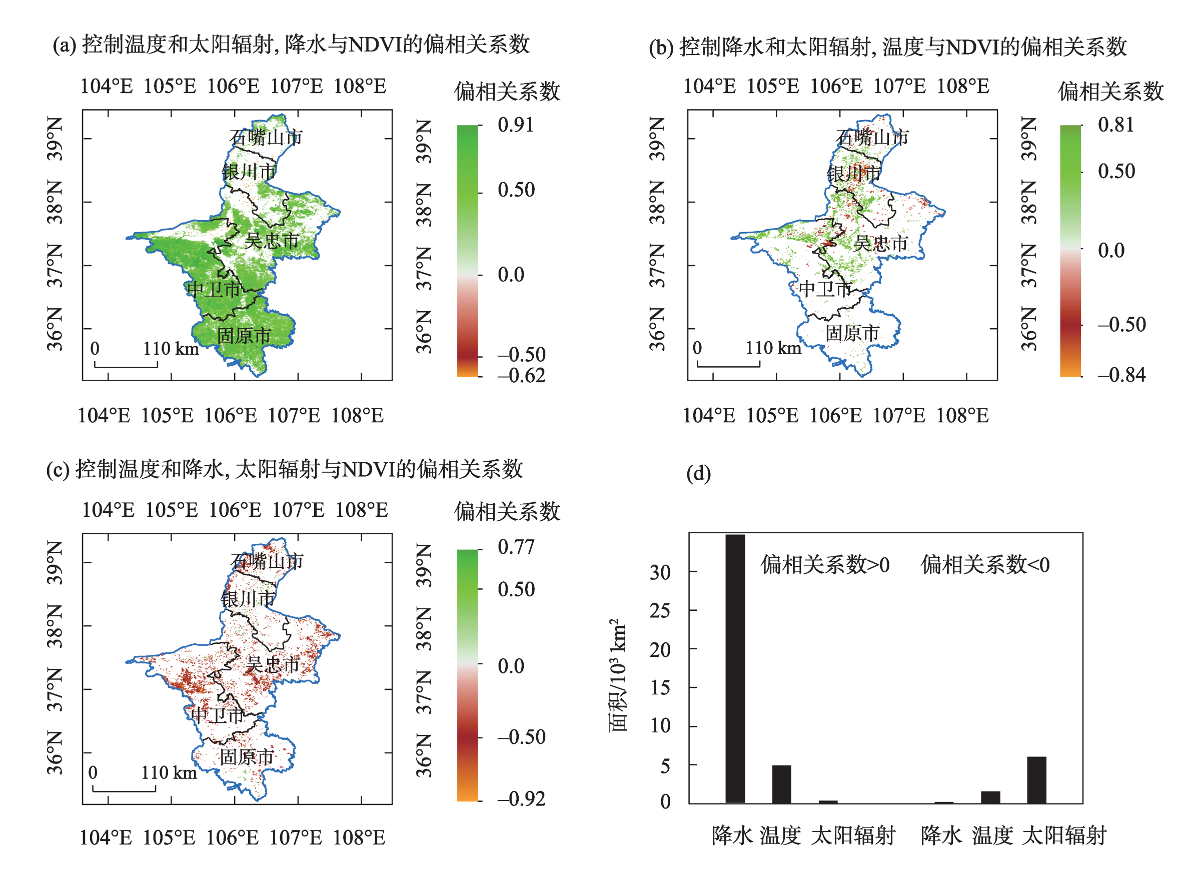


图8　通过 T 检验的降水、温度、太阳辐射和NDVI的偏相关关系($P<0.05$)

Fig. 8　Significant correlation coefficients between *pre*, *tem*, *solr*, and NDVI as determined by the *T*-test ($P<0.05$)

在NDVI减少区域(图9c、图9d),气候变化和人类活动的相对贡献率分别为43.89%和56.22%,其中59.06%区域面积的NDVI减少由人类活动所主导(相对贡献率>50%),其余由气候变化所主导。

4 讨论

本文通过对宁夏植被覆盖长时间序列变化进行研究发现,2001—2020年宁夏全区植被覆盖整体呈波动上升趋势,个别年份植被盖度有所降低,整体变化趋势与李梦华等[10]、杜灵通等[25]的研究结果一致。

植被覆盖变化受到气候和人类活动的共同作用影响[26-27]。在宁夏NDVI减少区域,气候变化的相对贡献率为43.89%,且由气候变化所主导的NDVI减少区域与NDVI和年均气温呈显著负相关的区域基本一致。分析认为,由于近年来气候变暖的影响,高温不仅会增加植被呼吸作用消耗的营养物质,同时会引起饱和水汽压亏缺以及潜在蒸散量的增加,从而抑制了植被生长甚至导致其出现退

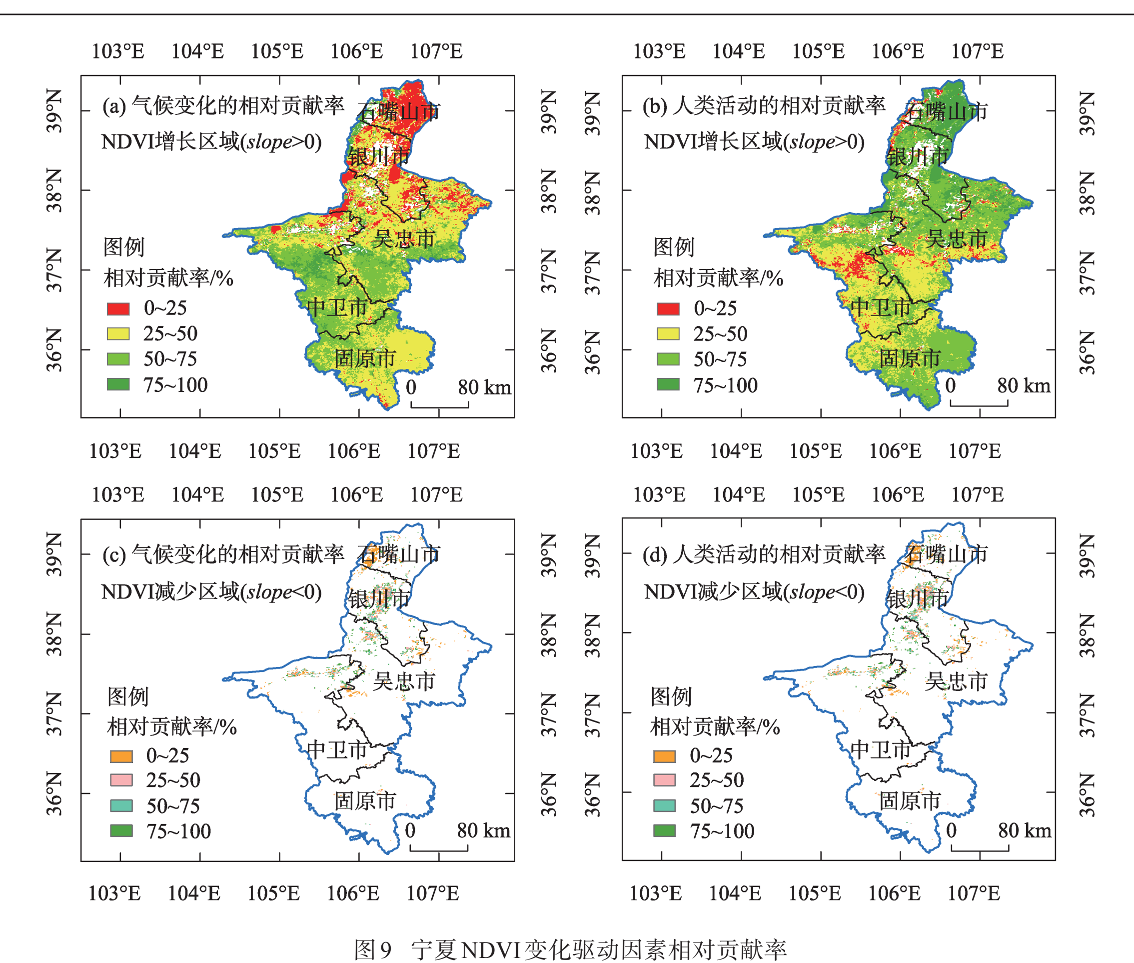


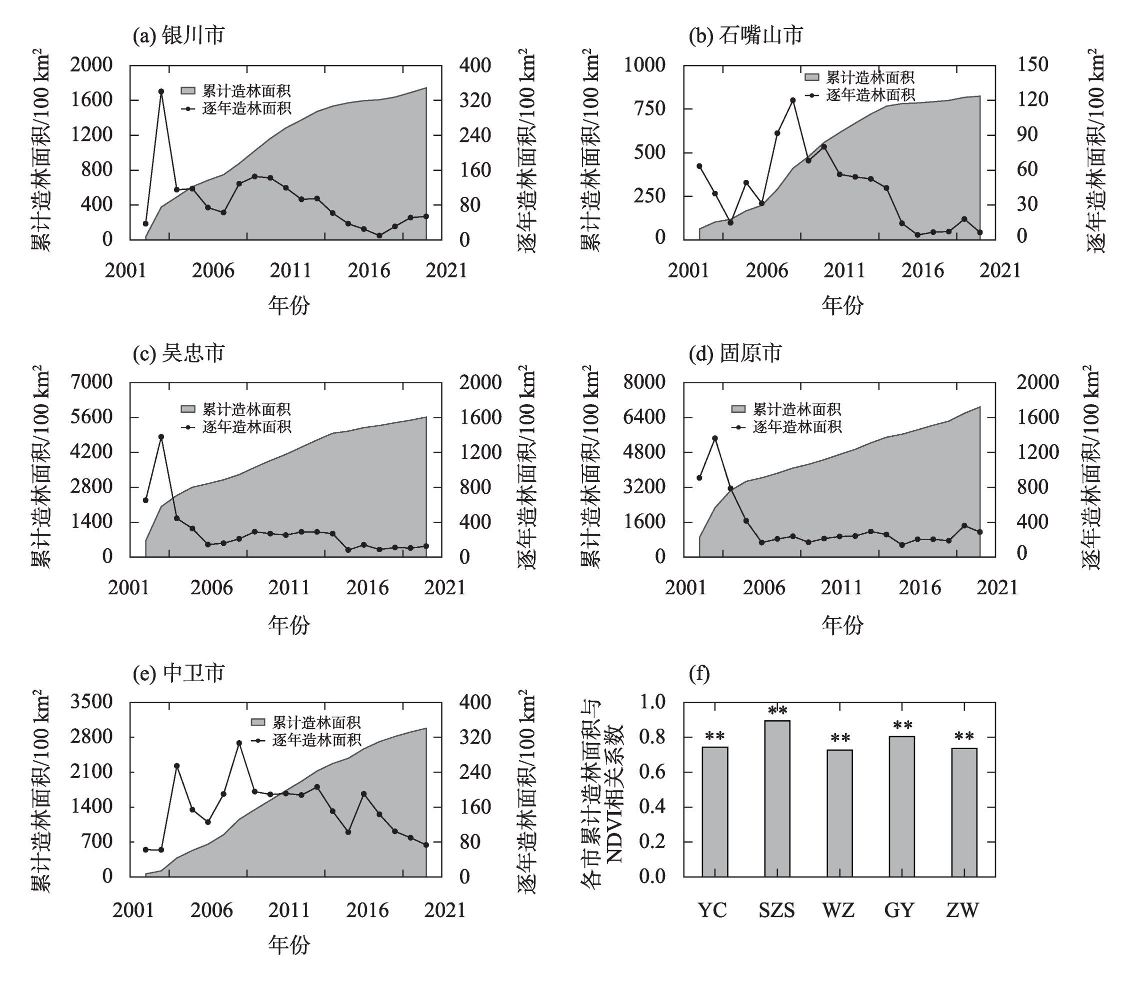
图9 宁夏NDVI变化驱动因素相对贡献率

Fig. 9 Relative contribution of climate variations and human activities to changes in NDVI in Ningxia

化[28-29];人类活动对宁夏NDVI减少的相对贡献率为56.22%,这是由于城镇化快速发展,建设用地增加(主要为沿黄城市分布区),侵占农田、林地等原来有植被覆盖的区域[30],压缩了植被生存空间。

在宁夏NDVI增加区域,人类活动对NDVI的增长起到主导作用,其相对贡献率为55.80%。分析认为这主要来源于宁夏境内一系列生态建设工程的实施。自1978年“三北”防护林工程实施以来,宁夏依托“三北”工程,结合生态移民迁出区生态修复、引黄灌区平原绿网提升、大规模国土绿化行动等一系列自治区重点工程[31],极大改善了区域内生态环境状况,有效治理了荒漠化和沙化,提高了植被覆盖度;同时随着退耕还林还草以及2003年自治区全境封山禁牧等工程的开展,区内林草植被得到了较好恢复。本文通过查询整理中国林业统计年鉴,得到宁夏各市2002—2020年逐年造林面积(图10a~图10e)。全区累计造林面积达18044.56 km^2,其中固原市累计造林面积最大,达到6879.64 km^2;其余各市累计造林面积分别为:吴忠市(5616.76 km^2)>中卫市(2980.87 km^2)>银川市(1743.3 km^2)>石嘴山市(823.99 km^2)。采用Pearson相关性分析法对宁夏各市2002—2020年逐年累计造林面积与逐年NDVI进行拟合。可以看出(图10f),宁夏各市逐年累计造林面积与NDVI之间均存在极显著相关性($P<0.01$),且石嘴山市相关系数最高,达到0.895,这与人类活动对NDVI增长相对贡献率的空间分布相符合;吴忠市相关系数在5个地市中处于较低水平,也达到了0.727。以上结果佐证了人类活动中生态建设工程对NDVI增长起到主要作用,这与Zhao等[32]研究结果一致。

根据Hurst指数趋势分析结果,未来宁夏全区有65.23%的区域面积植被可能会出现退化趋势,且退化趋势较强的区域主要分布在中部干旱带,文妙霞等[15]通过Hurst指数对宁夏草地植被覆盖未来变化趋势预测也得到了相似的结果。这些退化趋势较强的区域虽然面积占比较低,但也需引起重视。因此,为确保宁夏全区生态建设发展的可持续性,一方面,应加强对各自然保护区等重点区域的植被



注:**表示极显著相关($P<0.01$)。

图10 宁夏各市造林面积与NDVI相关性

Fig. 10 Correlation between afforestation area and NDVI for each city in in Ningxia

覆盖监测,同时重点关注城镇周边植被覆盖动态变化,建立有效的管护措施,巩固已有的生态建设成效;另一方面,未来的植被建设应遵循“尊重自然、顺应自然、保护自然”的原则,结合地区气候条件,确定合理的造林密度和树种,制定科学的生态修复措施,使生态修复与区域水文循环之间维持一定的平衡关系,助力打赢黄河“几字弯”宁夏攻坚战。

本文探究了宁夏2001—2020年植被NDVI时空变化特征及气候和人类活动对植被变化的影响,量化了气候和人类活动驱动因子的相对贡献率,为今后宁夏植被恢复建设提供基础参考。但也存在一定不足之处,例如对于气候变化和人类活动仅分析了二者整体对植被覆盖变化的影响,在下一步的研究中应细化各因子对NDVI的具体影响,包括降水、温度、太阳辐射等分别和NDVI变化的相关关系,以及人口密度、GDP、政策等数据结合应用其他领域的分析方法,进一步探究植被覆盖变化的驱动因素。

5 结 论

本文基于宁夏2001—2020年植被NDVI数据、气象数据等,采用趋势分析、多元回归残差分析以及Hurst指数分析方法,探究了近20 a植被全区NDVI时空变化特征及其驱动力作用,主要结论如下:

(1) 2001—2020年宁夏植被NDVI变化呈波动上升的趋势,多年均值空间分布具有异质性,整体呈现“引黄灌区和南部山区高-中部干旱带低”的特征,全区以低植被覆盖为主,集中分布在中部干旱带和贺兰山东麓地区。

(2) 近20 a宁夏全区94.94%的面积NDVI为增加趋势;显著退化区域主要集中在沿黄灌区的城镇分布区。结合Hurst指数,宁夏植被未来变化趋势主要表现为反持续性,全区有65.23%的区域植被存

在退化风险,需引起关注。

(3)气候变化和人类活动对宁夏NDVI的影响均以正面为主,全区89.49%的区域是在气候变化和人类活动共同作用下引起的NDVI增长。宁夏NDVI年均值与降水、温度之间以显著正相关为主,与太阳辐射之间以显著负相关为主。各气候要素中,降水对NDVI变化起主要促进作用。

(4)气候变化和人类活动对全区NDVI变化的相对贡献率分别为43.79%和56.21%。在NDVI增长区域和减少区域,人类活动均为引起NDVI变化的主导因素。

参考文献(References):

[1] 李茂华, 都金康, 李皖彤, 等. 1982—2015年全球植被变化及其与温度和降水的关系[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 823-832. [Li Maohua, Du Jinkang, Li Wantong, et al. Global vegetation change and its relationship with precipitation and temperature based on GLASS-LAI in 1982-2015[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(5): 823-832.]

[2] Li D, Pan M, Cong Z, et al. Vegetation control on water and energy balance within the Budyko framework[J]. Water Resources Research, 2013, 49(2): 969-976.

[3] 李鑫磊, 李瑞平, 王秀青, 等. 基于地理探测器的河套灌区林草植被覆盖度时空变化与驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 623-635. [Li Xinlei, Li Ruiping, Wang Xiuqing, et al. Spatio-temporal change and analysis of factors driving forest-grass vegetation coverage in Hetao Irrigation District based on geographical detector[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 623-635.]

[4] 崔林丽, 史军, 杨引明, 等. 中国东部植被NDVI对气温和降水的旬响应特征[J]. 地理学报, 2009, 64(7): 850-860. [Cui Linli, Shi Jun, Yang Yinming, et al. Ten-day response of vegetation NDVI to the variations of temperature and precipitation in Eastern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(7): 850-860.]

[5] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(3): 241-252.

[6] He L, Guo J, Yang W, et al. Multifaceted responses of vegetation to average and extreme climate change over global drylands[J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159942.

[7] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974. [Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities tovegetation NDVI change over China during 1982-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961-974.]

[8] He L, Guo J, Jiang Q, et al. How did the Chinese Loess Plateau turn green from 2001 to 2020? An explanation using satellite data[J]. Catena, 2022, 214: 106246.

[9] 田海静, 黄文广, 王林, 等. 宁夏20年禁牧封育政策对草原植被恢复贡献评估[J]. 草地学报, 2024, 32(1): 37-45. [Tian Haijing, Huang Wenguang, Wang Lin, et al. Evaluation on the contribution of the policy of grazing constraintand grassland conservation for 20 years to grassland vegetation restoration in Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(1): 37-45.]

[10] 李梦华, 韩颖娟, 赵慧, 等. 基于地理探测器的宁夏植被覆盖度时空变化特征及其驱动因子分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1317-1325. [Li Menghua, Han Yingjuan, Zhao Hui, et al. Analysis on spatial-temporal variation characteristics and driving factors of fractional vegetation cover in Ningxia based on geographical detector[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(7): 1317-1325.]

[11] 林妍敏, 李文慧, 南雄雄, 等. 基于地理探测器的宁夏贺兰山植被覆盖度时空分异及驱动因子[J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3321-3327. [Lin Yanmin, Li Wenhui, Nan Xiongxiong, et al. Spatial-temporal differentiation and driving factors of vegetation coverage in Ningxia Helan Mountain based on geodetector[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3321-3327.]

[12] 白思雨, 张佳瑜. 宁夏南部山区植被覆盖度变化及其地形因子相关性分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(1): 46-49. [Bai Siyu, Zhang Jiayu. Correlantion analysis between change of vegetation coverage and topographic factors in mountain land of southern Ningxia[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2024, 47(1): 46-49.]

[13] 付镇, 张志敏, 张变第, 等. 宁夏农牧交错区植被覆盖时空变化及成因分析[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 209-216. [Fu Zhen, Zhang Zhimin, Zhang Biandi, et al. Spatio-temporal variation and driving force driving force analysis if fractional vegetation coverage in agro-pastoral ecotone of Ningxia[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(2): 209-216.]

[14] 潘金金, 任宗萍, 胥世斌, 等. 宁夏不同植被类型NDVI变化特征及其对气候的响应[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4): 819-832. [Pan Jinjin, Ren Zongping, Xu Shibin, et al. Variation characteristics of NDVI of different vegetation types in Ningxia, China and their responses to climate[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 819-832.]

[15] 文妙霞, 何学高, 刘欢, 等. 基于地理探测器的宁夏草地植被覆被时空分异及驱动因子[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1322-1332. [Wen Miaoxia, He Xuegao, Liu Huan, et al. Analysis of the spatiotemporal variation characteristics and driving factors of grassland vegetation cover in Ningxia based on geographical detectors[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8): 1322-1332.]

[16] Angstrom A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation[J]. Quartarly Journal of the Royal Meteorolgical Society, 1924, 50(210): 121-156.

[17] 赵雨琪, 魏天兴. 1990—2020年黄土高原典型县域植被覆盖变化及影响因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(1): 147-156. [Zhao Yuqi, Wei Tianxing. Changes in vegetation cover and influencing factors in typical counties of theLoess Plateau from 1990 to 2020[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(1): 147-156.]

[18] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535-554.

[19] Sun W, Song X, Mu X, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 209-210(1): 87-99.

[20] Hurst H E. The problem of long-term storage in reservoirs[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 1956, 1(3): 13-27.

[21] 何亮, 梁海荣, 李钢铁, 等. 近20年杭锦旗植被覆盖变化特征及驱动力分析[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 587-596. [He Liang, Liang Hairong, Li Gangtie, et al. Analysis on the characteristics of changes and driving forces of vegetation cover in Hangjin County in recent 20 years[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(5): 587-596.]

[22] 马楠, 白涛, 蔡朝朝. 2000—2021年新疆植被覆盖度变化及驱动力[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 385-394. [Ma Nan, Bai Tao, Cai Zhaozhao. Vegetation cover change and its response to climate and surface factors in Xinjiang based on different vegetation types [J]. Research of Soiland Water Conservation, 2024, 31(1): 385-394.]

[23] Zhang Y, Ye A. Spatial and temporal variations in vegetation coverage observed using AVHRR GIMMS and Terra MODIS data in the mainland of China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(11): 4238-4268.

[24] 曹永香, 毛东雷, 薛杰, 等. 绿洲-沙漠过渡带植被覆盖动态变化及其驱动因素——以新疆策勒为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 510-521. [Cao Yongxiang, Mao Donglei, Xue Jie, et al. Dynamic changes and driving factors of vegetation cover in the oasis-desert ecotone: A case study of Cele, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 510-521.]

[25] 杜灵通, 宋乃平, 王磊, 等. 近30 a气候变暖对宁夏植被的影响[J]. 自然资源学报, 2015, 30(12): 2095-2106. [Du Lingtong, Song Naiping, Wang Lei, et al. Impact of global warming on vegetation activity in Ningxia Province from 1982 to 2013[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(12): 2095-2106.]

[26] Piao S, Yin G, Tan J, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years[J]. Global Change Biology, 2015, 21(4): 1601-1609.

[27] 韩磊, 曹鑫鑫, 朱会利, 等. 基于特征分区的陕北黄土高原植被覆盖变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8564-8577. [Han Lei, Cao Xinxin, Zhu Huili, et al. Change of vegetation coverage and driving factor in the North Shaanxi Loess Plateau based on characteristic zoning[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (20): 8564-8577.]

[28] Jiao K, Gao J, Wu S. Climatic determinants impacting the distribution of greenness in China: Regional differentiation and spatial variability[J]. International Journal of Biometeorology, 2019, 63: 523-533.

[29] 吴万民, 刘涛, 陈鑫. 西北干旱半干旱区NDVI季节性变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 1969-1981. [Wu Wanmin, Liu Tao, Chen Xin. Seasonal changes of NDVI in the arid and semi-arid regions of Northwest Chinaand its influencing factors[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(12): 1969-1981.]

[30] EL-hamid H T, Wei C Y, Hafiz M A, et al. Effects of land use/land cover and climatic change on the ecosystem of North Ningxia, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13: 1099.

[31] 王治啸, 许扬, 陶克图, 等. 筑梦“绿色长城”——宁夏三北防护林体系建设工程40年[J]. 宁夏画报(时政版), 2018(4): 12-23. [Wang Zhixiao, Xu Yang, Tao Ketu, et al. Building a dream of “Green Great Wall”-40 years of construction of the Three-North Shelterbelts in Ningxia[J]. Ningxia Pictorial (Politics Edition), 2018(4): 12-23.]

[32] Zhao A, Zhang A, Liu X, et al. Spatiotemporal changes of normalized difference vegetation index (NDVI) and response to climate extremes and ecological restoration in the Loess Plateau, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 132: 555-567.

Study on the characteristics of changes in vegetation cover and its driving forces in the Three-North Shelterbelt program regions: Taking Ningxia as example

QI Ronglian[1], LI Qingbo[1], REN Jia[1], ZOU Miao[1], YANG Haopeng[1], WEI Yaofeng[1], TANG Qiong[2]

(1. Ningxia Forestry Investigation and Planning Institute, Yinchuan 750010, Ningxia, China; 2. Workstation of Alxa Right Banner Forestry and Grassland, Alxa League 737300, Inner Mongolia, China)

Abstract: Ningxia as the only province whose entire territory is included in the "Three-North project," has an extremely important ecological location. This study investigated the temporal-spatial variation in the normalized difference vegetation index (NDVI) and quantified the impact of climate variations (CV) and human activities (HA) on NDVI based on various datasets (e.g., NDVI and meteorological dataset) and methods (e.g., trend analysis and residual trend analysis). The trend of future NDVI in the Ningxia was also determined using the Hurst index. Results demonstrated that (1) NDVI fluctuated, showing an increase at a rate of 7.6×10^{-3} a^{-1} during the study period. The spatial distribution of NDVI was heterogeneous, showing the characteristics of "Yellow River diversion irrigation area and southern mountainous area high and central-arid zone low." NDVI in the Ningxia generally belonged to low-level vegetation cover ($0.2<NDVI\leqslant0.4$) with a proportion of >50%. (2) NDVI exhibited an overall increasing trend across 94.94% of the total Ningxia from 2001 to 2020. Furthermore, 65.23% of vegetation of the study area in the future may be at potential risk of degradation. (3) Both CV and HA exerted a positive effect on the amelioration of NDVI, and increases in NDVI in 89.49% of the total Ningxia were controlled by the interactive effect of CV and HA. Among the climate factors, precipitation played a major role in promoting the change of NDVI. (4) The relative contribution rates of CV and HA to changes in NDVI were 43.79% and 56.21%, respectively. Overall, in future programs on vegetation restoration and ecological construction, the primary role of human activities in increasing vegetation cover should be actively exploited, and monitoring and management of the existing vegetation should be strengthened to avoid its degradation trend.

Keywords: changes in vegetation cover; climate variations; human activities; driving forces; Ningxia